

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE SOLUBILIZADO Y DEL TIEMPO DE
INMERSIÓN EN CLORURO DE HIERRO " FeCl_3 " SOBRE LA CORROSIÓN
POR PICADURA DE DOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS
"UNS S20200 Y UNS S30403"

CATALINA JARAMILLO ESCOBAR
EDWARD JOSÍAS LÓPEZ ALFONSO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA
PEREIRA RISARALDA

2016

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE NORMALIZADO Y DEL TIEMPO DE
INMERSIÓN EN CLORURO DE HIERRO "FeCl₃" SOBRE LA CORROSIÓN
POR PICADURA DE DOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS
"UNS S20200 Y UNS S30403"

CATALINA JARAMILLO ESCOBAR

Código 24.341.609

EDWARD JOSÍAS LÓPEZ ALFONSO

Código 1.088.282.453

Trabajo de grado en la modalidad
de aplicación del conocimiento del programa de formación
y trabajo de investigación para optar al título de
Tecnólogo Mecánico por parte de los autores

INGENIERO DAIRO MESA

DIRECTOR

JOSÉ WILMAR CALDERÓN HERNÁNDEZ

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA

PEREIRA RISARALDA

2016

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al esfuerzo, dedicación y compromiso de todas aquellas personas que directa e indirectamente hicieron parte de este proyecto.

En primer lugar, a nuestro director de tesis, Dr. Dairo Hernán Mesa, por su paciencia ante nuestra inconsistencia, su compromiso, sus recomendaciones, consejos y acompañamiento en esta ardua labor. Gracias a su empeño pudimos concluir esta tarea que nos ayudó a acrecentar nuestros conocimientos y a culminar esta etapa de nuestras vidas.

De igual manera, queremos agradecer al Ingeniero José Wilmar Calderón Hernández por sus apreciados y relevantes aportes, críticas, comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

A nuestras familias el más especial de los agradecimientos por alentarnos y brindarnos siempre su apoyo. Todo esto nunca hubiera sido posible sin el amparo incondicional y el cariño que nos brindaron.

A nuestros compañeros, amigos y docentes que influyeron de una u otra forma para finalizar este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 RESEÑA HISTÓRICA DEL ACERO INOXIDABLE.....	11
2.2 CLASIFICACIÓN Y GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES...	13
2.2.1 Aceros inoxidable ferríticos.....	14
2.2.2 Aceros inoxidable martensíticos.....	14
2.2.3 Aceros inoxidable endurecibles por precipitación (PH).....	16
2.2.4 Aceros inoxidable dúplex.....	16
2.2.5 Aceros inoxidable austeníticos.....	16
2.2.6 Serie AISI 300.....	17
2.2.7 Serie AISI 200.....	17
2.2.8 Acero inoxidable austenítico UNS S30403.....	19
2.2.9 Acero inoxidable austenítico UNS S20200.....	19
2.3 CORROSIÓN.....	22
2.3.1 Corrosión por picadura.....	23
2.4 TÉCNICAS Y/O MÉTODOS DE ENSAYOS DE CORROSIÓN.....	27
2.4.1 Polarización potenciodinámica	27
2.4.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR).....	28
2.4.3 Impedancia electroquímica (EIS).....	29
2.4.4 Ruido electroquímico (EN).....	29
2.4.5 Cupones.....	29
2.4.6 Resistencia.....	29
2.4.7 Inmersión.....	29

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	31
3.1 MATERIALES.....	31
3.1.1 Preparación de muestras para las pruebas de inmersión.....	31
3.1.2 Preparación metalográfica.....	34
3.2 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.....	35
3.2.1 Norma ASTM G48.....	35
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	37
4.1 METALOGRAFÍA.....	37
4.2 PRUEBAS DE INMERSIÓN.....	38
5. CONCLUSIONES.....	47
6. RECOMENDACIONES.....	47
7. BIBLIOGRAFÍA.....	48

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Composición y propiedades típicas de los aceros inoxidable.....	18
Tabla 2. Composición química de los aceros UNS S30403 y S20200.....	20
Tabla 3. Propiedades mecánicas nominales de los aceros UNS S30403 y S20200.....	20
Tabla 4. Valores PRE y MARC de los aceros UNS S20200 y el UNS S30403....	22
Tabla 5. Unidades de la velocidad de corrosión y valores de la constante K.....	39
Tabla 6. Resultados prueba de inmersión.....	40

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	LEYENDA	PÁGINA
Figura 1	Edificio Chrysler (1930), en Nueva York sus pisos superiores y su aguja están cubiertos de acero inoxidable 302 (UNS S30200)	12
Figura 2	Primer Avión Anfibio 1931	13
Figura 3	Efecto de 17% Cr sobre el diagrama de fases hierro-carbono. A bajo contenido de carbono, la ferrita es estable en todas las temperaturas	15
Figura 4	Microestructura del acero inoxidable martensítico conteniendo grandes carburos primarios y carburos pequeños formados durante el revenido (350X)	16
Figura 5	Acero inoxidable austenítico (500X)	17
Figura 6	Corrosión en un tornillo sinfín	23
Figura 7	Morfología y caracterización de la corrosión por picadura	25
Figura 8	Variación en la sección transversal de la picadura	26
Figura 9	Mecanismo autocatalítico de corrosión por picadura	27
Figura 10	Curva de polarización potenciodinámica cíclica, realizada sobre un acero UNS S30403	28
Figura 11	(a y b) Horno eléctrico en el cual se sometieron las muestras a las diferentes temperaturas. (c) Recipiente con agua a temperatura ambiente	32
Figura 12	(a) Lavador ultrasónico. (b) Calibrador pie de rey. (c) Secador de chorro de aire caliente. (d) Balanza analítica	33
Figura 13	Algunas de las muestras y sobres numerados para su identificación.	34
Figura 14	Máquina pulidora metalográfica de paño	34
Figura 15	Microscopio Óptico	35
Figura 16	Disposición de las muestras durante los ensayos de inmersión. (a) antes de la inmersión. (b) durante la inmersión	36
Figura 17	(a) Inclusiones en el acero UNS S30403 y (b) Inclusiones en el acero UNS S20200	37
Figura 18	Micrografías de los aceros: UNS S30403 (a) y (b) y UNS S20200 (c) y (d) a 100X y 200X respectivamente (ataque agua regia).	38

Figura 19	Velocidad de corrosión en función de la temperatura	41
Figura 20	Pérdida de masa en función de la temperatura	41
Figura 21	Visualización de los daños causados por la corrosión por picadura después de la inmersión, cara anterior (izquierda) y posterior(derecha) de cada muestra	43
Figura 22	Muestras de cada material luego de ser sometidas a inmersión	44
Figura 23	Micrografía del acero UNS S20200. (a) Contorno total de la picadura (100X) y (b) Contorno seccionado de la picadura (100X). (c) Morfología interna de la picadura (200X). (d) Morfología interna de la sección transversal de la picadura (100X)	45
Figura 24	Micrografía del acero UNS S30403. (a) Contorno total de la picadura (100X) y (b) Contorno seccionado de la picadura (40X). (c) Morfología interna de la picadura (200X). (d) Morfología interna de la sección transversal de la picadura (40X)	46

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable austeníticos son altamente utilizados en varios sectores de la industria ya que poseen una elevada resistencia a la corrosión, y excelentes propiedades mecánicas, haciendo que estos sean apropiados para gran variedad de usos. Los aceros inoxidable austeníticos tienen una mayor participación comercial, a nivel mundial, dentro de las diferentes familias de aceros inoxidable. Después del cromo (Cr), el principal elemento de aleación de los aceros inoxidable austeníticos es el níquel (Ni).

El níquel es el principal elemento estabilizador de la fase austenítica, aunque no es el único elemento que cumple con esta función. En este contexto, el manganeso (Mn) se puede considerar como posible sustituto del níquel, una vez que también presenta el carácter austenitizador.

A pesar de poseer alta resistencia a la corrosión, los aceros inoxidable austeníticos presentan problemas cuando son sometidos a ambientes poco favorables, siendo que un tipo de corrosión que ataca con bastante frecuencia a estos materiales es la corrosión por picadura.

Para entender el fenómeno de la corrosión en aceros inoxidable austeníticos, se hace necesario realizar estudios adecuados y comparaciones entre algunos aceros pertenecientes a esta familia, con diferentes elementos austenizantes, y de esta manera determinar el comportamiento frente a la corrosión, al ser sometidos a un ambiente corrosivo, a través de pruebas de laboratorio. De esta manera, es posible establecer cuál de los materiales es una alternativa idónea a utilizar en determinados ambientes corrosivos, con el fin de minimizar los impactos económicos y ambientales generados por la corrosión por picadura de los aceros inoxidable.

Para el análisis de la corrosión en los aceros inoxidable que fueron usados en este trabajo, fue necesario hacer uso de los laboratorios de corrosión, polímeros y de química de la Universidad Tecnológica de Pereira, al igual que contar con los reactivos y equipos de medición necesarios para la realización de ensayos y análisis de resultados.

El objetivo del presente trabajo fue analizar la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidable austeníticos UNS S20200 Y UNS S30403 sometidos para diferentes temperaturas de tratamiento térmico de solubilización (1000°C, 1050°C y 1100°C), se determinó cuál es la mejor alternativa de uso en ambientes corrosivos conteniendo cloruro.

Se determinó, que material entre el UNS S20200 y el UNS S30403, posee mayor resistencia a la corrosión por picadura después de haber sido sometidos a la inmersión en cloruro de hierro FeCl_3 y a diferentes tiempos de solubilización.

Se realizó el análisis comparativo de los cambios morfológicos en los aceros UNS S20200 y UNS S30403 por efecto del medio corrosivo FeCl_3 .

Se analizaron los cambios en los aceros UNS S20200 y UNS S30403 después de haber sido sometidos a tratamientos térmicos de solubilización en temperaturas de 1000°C , 1050°C y 1100°C .

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESEÑA HISTÓRICA

Los primeros estudios sobre las aleaciones de cromo y ferro-cromo datan de 1821, donde Pierre Berthier publicó los primeros resultados. Entre 1904-1911, Leon Alexandre Guillet hace públicas sus investigaciones sobre las aleaciones de hierro, cromo y níquel que hoy en día se consideran aceros inoxidable; por su parte, Albert Marcel Portevin continúa las investigaciones de Guillet, junto con W. Giesen donde publican información de algunos aceros inoxidables que aproximadamente son equivalentes con los aceros austeníticos, martensíticos y ferríticos de hoy en día (1).

En 1911, Elwood Haynes determinó el efecto del cromo en la resistencia a la corrosión de las sustancias químicas y la atmósfera y es en 1913, donde Harry Brearley en Sheffield (Reino Unido), es pionero en la fundición y forja de cuchillos de mesa, que fue la primera aplicación comercial que se le diera al acero inoxidable y que sería el inicio de miles de aplicaciones (1).

Eduard Maurer y Benno Strauss, fueron los primeros investigadores en desarrollar el acero inoxidable austenítico; esto ocurrió entre los años 1909 y 1912; posteriormente fue comercializado en las acerías de Friedrich A. Crupp en la ciudad de Essen (Alemania). La aleación llamada V2A, tenía una composición similar al actual acero AISI 304 (UNS S30400), también conocido como 18-8 porque contiene un 18% de Cromo y un 8% de Níquel. Este acero se caracterizó por tener una alta resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes conteniendo ácido nítrico. Tras las investigaciones de los alemanes, se exploraron las propiedades del material en entornos con altas temperaturas, donde se descubrió que por el alto contenido de Cromo (18%-20%), el acero V2A era resistente a gases calientes de diversos tipos (1).

Los rascacielos son las pirámides del siglo XX, por lo que las primeras aplicaciones del acero inoxidable estuvieron presentes en los edificios más altos del mundo. El edificio Chrysler, por su parte, deja ver su elegante y reluciente acero inoxidable al estilo art déco, siendo un eterno ejemplo de rascacielos bien diseñado, donde sus pisos superiores y su mástil están cubiertos de acero inoxidable, como se observa en la figura 1 (a) a (d).

Figura 1. Edificio Chrysler (construido en 1930), en Nueva York. Sus pisos superiores y su mástil están cubiertos de acero inoxidable AISI 302 (UNS S30200)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: La revista Nickel es una publicación del Dr. Kevin Bradley. Revista Nickel. Instituto del Níquel. Editora: Stephanie Dunn. Eighth Floor Avenue des Arts 13-14 Bruselas 1210 (Bélgica)

El acero inoxidable tiene su intervención en todos los tipos de transporte, desde automóviles y camiones hasta vagones de tren, barcos e incluso aviones. El primer vehículo de acero inoxidable fue el avión anfibia, mostrado en la figura 2, construido en 1931 por la empresa Budd Company, en Filadelfia (Pensilvania, Estados Unidos)

Figura 2. Primer Avión Anfibia 1931.



Fuente: La revista Nickel es una publicación del Dr. Kevin Bradley. Revista Nickel. Instituto del Níquel. Editora: Stephanie Dunn. Eighth Floor Avenue des Arts 13-14 Bruselas 1210 (Bélgica)

2.2 CLASIFICACIÓN Y GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES

La International Stainless Steel Forum (ISSF), describe los aceros inoxidables como una familia muy versátil de materiales de ingeniería que son seleccionados principalmente, por su alta resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables, se debe a su alto contenido de Cromo, donde se debe asegurar la presencia mínimo de un 10,5% de este elemento para que sea inoxidable. La función principal del cromo es formar una capa

superficial que protege la subyacente aleación de hierro-cromo de la corrosión. El cromo reacciona con el oxígeno y la humedad en el medio ambiente formando una película de óxido conocida como capa pasiva o límite, esta capa tiene una propiedad auto-regeneradora, es decir, se auto-repara formando una capa de óxido.

Los aceros que poseen más del 10,5% Cr, son más resistentes a la corrosión. Adicionalmente se incorporan otros elementos como en este caso níquel en un 8%, molibdeno que aumenta aún más la resistencia a la corrosión y en particular a la corrosión por picadura y el nitrógeno que también hace que haya mayor resistencia a la corrosión por picadura y aumente la resistencia mecánica del material (2).

Existen varias clases de aceros inoxidables basados en su estructura cristalina, endurecimiento por precipitación y composición química. A continuación se describen brevemente las 5 familias principales de aceros inoxidables y las series correspondientes al material de investigación del presente trabajo (3).

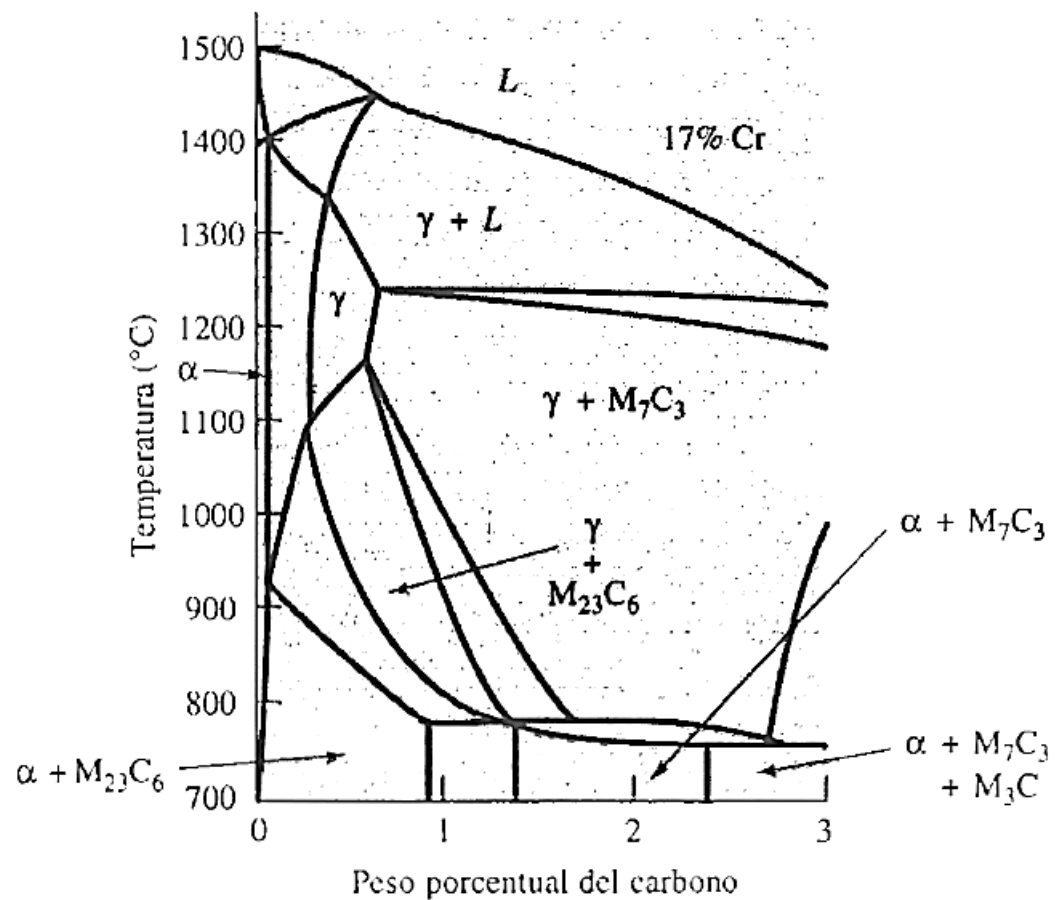
2.2.1 Aceros inoxidables ferríticos: Un acero inoxidable ferrítico es un material que se caracteriza por tener una buena resistencia a la corrosión en medios moderadamente agresivos y, una alta facilidad para dejarse conformar en frío. Estos aceros contienen hasta 30% Cr y menos de 0,12% C; poseen estructura cristalina de BCC (cúbica de cuerpo centrado). Los aceros inoxidables ferríticos poseen buena resistencia mecánica y ductilidad moderada, derivadas del endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación. Además tienen excelente resistencia a la corrosión, una conformabilidad moderada y son relativamente económicos.

Los aceros inoxidables ferríticos asocian una buena resistencia a la corrosión (con una proporción de cromo usualmente en los aceros comerciales de 17% Cr) y una buena resistencia a la oxidación a alta temperatura. Son siempre magnéticos. No endurecen por tratamiento térmico y no se pueden transformar por endurecido por laminado en frío (4).

2.2.2 Aceros inoxidables martensíticos: Un acero inoxidable martensítico se caracteriza por su aptitud frente al endurecimiento por tratamiento térmico de temple y revenido. Presenta un excelente comportamiento a la fatiga, asociado y de resistencia a la corrosión en medios poco agresivos. En la figura 3 puede notarse que una aleación con 17% Cr-0,5 % C sometida a una temperatura de 1200°C produce austenita en un 100 por ciento, que al templarse en aceite se transforma en martensita. La martensita es revenida para eliminar las tensiones generadas durante la transformación martensítica y ablandar la estructura devolviéndole tenacidad al material, pero con la posibilidad de formar carburos. En la figura 4 se puede apreciar el contenido de carburos formados durante el revenido.

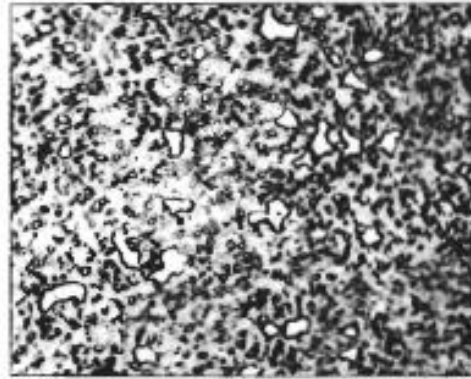
El contenido de cromo, en los aceros inoxidable martensíticos, es por lo general entre (12% a 15%), siendo más resistentes mecánicamente pero menos resistentes a la corrosión. Si existe baja cantidad de cromo, es permitido que el contenido de carbono varíe aproximadamente entre 0,1% hasta 1,0%, lo que genera martensita con diferentes durezas. Las propiedades que adquiere este material son una combinación de resistencia mecánica, dureza y moderada resistencia a la corrosión.

Figura 3. Efecto de 17% Cr sobre el diagrama de fases hierro-carbono. A bajo contenido de carbono, la ferrita es estable a todas las temperaturas.



Fuente: De Metals Handbook, Vol. 7 y 8, 8ª Ed., American Society for Metals, 1972, 1973.

Figura 4. Microestructura del acero inoxidable martensítico conteniendo grandes carburos primarios (blancos) y carburos pequeños (oscuros) formados durante el revenido (350X)



Fuente: De Metals Handbook, Vol. 7 y 8, 8ª Ed., American Society for Metals, 1972, 1973.

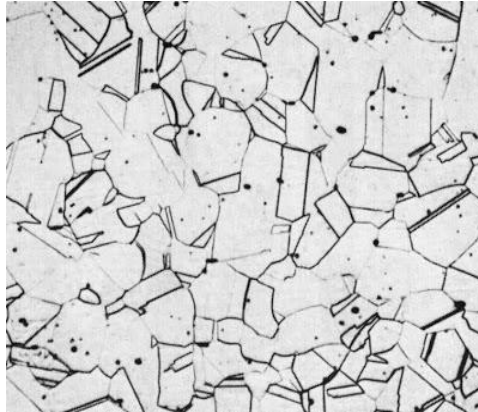
2.2.3 Aceros inoxidables endurecibles por precipitación (PH): Este acero se calienta primero y luego es templado para hacer que la austenita se transforme en martensita. Estos aceros contienen Al, Nb o Ta y sus propiedades se deben a la posibilidad de endurecerlos por solución sólida, por deformación, por envejecimiento o por transformación martensítica (temple común). El recalentamiento de este acero a una temperatura entre 455 y 565 °C proporciona precipitados como el Ni_3Al a partir de la martensita, tratamiento térmico que recibe el nombre de envejecido, el cual da lugar a la precipitación de los compuestos intermetálicos endurecedores.

2.2.4 Aceros inoxidables dúplex: Estos aceros contienen microestructura de dos fases (austenita y ferrita), que es producida mediante un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico, conteniendo aproximadamente 50 por ciento de cada fase. Las propiedades mecánicas que se obtienen a partir de esta combinación son conformabilidad, resistencia a la corrosión y soldabilidad que no se obtienen en ningún otro de los aceros inoxidables.

2.2.5 Aceros inoxidables austeníticos: Un acero inoxidable austenítico se caracteriza por poseer una buena resistencia a la corrosión, buena ductilidad, facilidad para ser soldado, aptitud al pulido y por unas buenas propiedades de embutición. El níquel es el elemento estabilizador de la austenita; y como puede ser visto en el diagrama Fe-C-Cr, mostrado en la figura 3, incrementa el área de austenita y prácticamente elimina la ferrita de este tipo de aleaciones. Si el contenido de carbono es menor al 0,03%, no se forman carburos y prácticamente el acero será todo austenita a temperatura ambiente (ver Figura 5). Los aceros inoxidables austeníticos (FCC, cubica centrada en las caras) tienen excelente conformabilidad, ductilidad y moderada resistencia mecánica, siendo los mejores, entre todos los aceros inoxidables, en lo que tiene que ver en la resistencia a la corrosión. La resistencia mecánica se obtiene a través de solución sólida, estos

aceros pueden deformarse en frío para obtener más resistencia que los ferríticos. Los austeníticos a bajas temperaturas son muy resistentes al impacto, debido a que no tienen temperatura de transición, además, estos aceros no son ferromagnéticos. Estas aleaciones son demasiado costosas debido a su alto contenido en níquel y cromo.

Figura 5. Acero inoxidable austenítico (500X)



Fuente: De Metals Handbook, Vol. 7 y 8, 8ª Ed., American Society for Metals, 1972, 1973. Su microestructura se reconoce fácilmente por la presencia de maclas (deslizamiento de planos atómicos que se observan como líneas rectas) dentro de los granos.

A continuación se hace una breve descripción de los aceros inoxidables teniendo en cuenta la clasificación AISI-SAE.

2.2.6 Serie AISI 300: Son aleaciones Cromo-Níquel. Es la categoría más extensa y utilizada en la industria por la amplia variedad de propiedades; el contenido de cromo varía de 16 al 28%, el del níquel de 3,5 a 22% y el de molibdeno de 1,5 a 6%. Los aceros de esta serie tienen alta resistencia a la corrosión, son fáciles de transformar, tienen excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, el factor higiene-limpieza es elevado, se puede utilizar tanto a altas temperaturas como a temperaturas criogénicas.

Sus principales usos son en la industria alimenticia, en materiales hospitalarios, en utensilios de uso doméstico, en tanques de almacenamiento, tuberías, etc.

2.2.7 Serie AISI 200: Durante la segunda guerra mundial, se vio reflejada en las industrias una gran falta de níquel, lo que llevó a los científicos a buscar nuevas alternativas para fabricar acero inoxidable, de allí surgieron los aceros de la serie 200, con menor contenido de níquel y al cual se le adicionó manganeso. El contenido de manganeso oscila entre el 5 al 20%, con el fin de estabilizar aún más la fase austenítica, a este tipo de aceros se les adiciona nitrógeno. Esta serie tiene

propiedades magnéticas similares a los aceros inoxidables 304, pero poseen menor resistencia a la corrosión (5).

Los materiales de la serie 200 son utilizados en la fabricación de muebles para cocinas, máquinas alimenticias, extractores, lavaplatos. En la tabla 1 se presentan algunas propiedades mecánicas y la composición química de las diferentes familias de aceros inoxidables.

Tabla 1. Composición y propiedades mecánicas típicas de algunos de los aceros inoxidables más utilizados en la industria.

Acero	% C	% Cr	% Ni	Otros	Resistencia mecánica la tensión (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	% elongación	Estado
Austenítico:								
201	0.15	17	5	6.5%Mn	95,000	45,000	40	Recocido
304	0.08	19	10		75,000	30,000	30	Recocido
					185,000	140,000	9	Deformado en frío
304L	0.03	19	10		75,000	30,000	30	Recocido
316	0.08	17	12	2.5% Mo	75,000	30,000	30	Recocido
321	0.08	18	10	0.4% Ti	85,000	35,000	55	Recocido
347	0.08	18	11	0.8% Nb	90,000	35,000	50	Recocido
Ferrítico:								
430	0.12	17			65,000	30,000	22	Recocido
442	0.12	20			75,000	40,000	20	Recocido
Martensítico:								
416	0.15	13		0.6% Mo	180,000	140,000	18	Templado y revenido
431	0.20	16	2		200,000	150,000	16	Templado y revenido
440C	1.10	17		0.7% Mo	285,000	275,000	2	Templado y revenido
Endurecimiento por precipitación:								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	190,000	170,000	10	Endurecido por envejecimiento
17-7	0.09	17	7	1.0% Al	240,000	230,000	6	Endurecido por envejecimiento

Fuente: Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald Askeland, 3ra edición.

A continuación se hace una descripción detallada del acero UNS S30403 y del acero UNS S20200, los cuales fueron usados en el presente trabajo.

2.2.8 Acero inoxidable austenítico UNS S30403. Esta aleación de acero inoxidable austenítico, tiene un mínimo de 18 % de cromo y 8% de níquel, con un máximo de 0,07% de carbono; es una de las aleaciones más versátiles y más utilizadas en la familia de aceros inoxidables, por lo que son ideales para una gran variedad de aplicaciones domésticas y comerciales, cuentan con excelente resistencia a la corrosión, son fáciles de producir y de excelente maleabilidad. Los aceros inoxidables austeníticos son considerados los más soldables de los aceros de alta aleación, pudiéndose usar todos los procesos de fusión y resistencia.

El acero inoxidable UNS S30403 se utiliza en una gran variedad de aplicaciones domésticas y comerciales, incluyendo: equipo para procesar alimentos, particularmente para fabricar cerveza, procesar leche, hacer vino y procesos frigoríficos; bancos, lavabos, canales y aplicaciones para la cocina; asientos y molduras arquitectónicas; uso en la industria automóvil, aeroespacial y ferroviaria; material para construcción de edificios; industria farmacéutica y hospitalaria; contenedores químicos, incluso para transportación; intercambiadores de calor; nudos, pernos, tornillos y otros tipos de sujetadores para la industria marina; industria del teñido; rejas tejidas o soldadas para la minería y filtrado de agua. (6)

2.2.9 Acero inoxidable austenítico UNS S20200. Esta aleación de acero inoxidable austenítico, tiene un mínimo de 17 % de cromo, 7,5 % de manganeso y 4 % de níquel con un máximo de 0,15 de carbono, esto hace que sea un material con un excelente grado de dureza a bajas temperaturas además de su buena resistencia a la tracción.

El acero inoxidable UNS S20200 es ampliamente utilizado en aplicaciones arquitectónicas como la construcción de puertas, ventanas, decoraciones, barandillas de carretera, servicios de hotel, centros comerciales, apoyabrazos e instalaciones públicas; industria del petróleo y química; equipos para procesar alimentos, utensilios de restaurante, hornos y revestimiento de refrigeradores; calderas, recipientes a presión y sumideros; materiales para la construcción de edificios; industria del papel, azucarera, energía eléctrica y nuclear; en la construcción de maquinaria automotriz, naval y ferroviaria; abrazaderas, tornillos y tuercas. (7)

En la tabla 2 se muestran las composiciones químicas de los aceros UNS S30403 y S20200 y en la tabla 3 algunas de sus propiedades mecánicas.

Tabla 2. Composición química de los aceros UNS S30403 y S20200.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (%)	P (%)	S (%)
UNS S30403	0.025	0.5	1.3	18.1	8.5	0.04	0	0.045	0,03
UNS S20200	0.042	0.36	7.09	18.1	4.06	0.062	0.25	0.034	0.003

Fuente: Scientia et Technica Año XII, No 32, Diciembre de 2006 UTP. ISSN 0122-1701, EFECTO DEL NITRÓGENO EN EL DESGASTE EROSIVO Y CORROSIVO DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO UNS S30403 (AISI-SAE 304L).

De la tabla anterior, caber resaltar que los dos materiales tienen el mismo contenido de Cr, pero parte del Ni que tiene el UNS S30403 es substituido por Mn en el acero UNS S20200.

Tabla 3. Propiedades mecánicas nominales de los aceros UNS S30403 y S20200.

	Resistencia a la tracción Mpa	Límite elástico 0,2% Mpa	Elongación %	Dureza Rockwell	Módulo de elasticidad Gpa
UNS S30403	558	269	55	B79	193
UNS S20200	612	310	40	B90	207

Fuente: PIERRE R, Roberge. Handbook of Corrosion Engineering. Library of Congress Cataloging-in-Publication. Data New York, McGraw-Hill, 1999. 1130 p.

La resistencia al ataque de corrosión por picadura de un acero inoxidable depende de su composición química, donde el cromo, nitrógeno y molibdeno mejoran la resistencia a la picadura, esto debido a que el cromo es el principal elemento de aleación en el acero inoxidable y esencial en la formación de la capa pasiva; el nitrógeno aumenta la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión por picadura en aceros austeníticos; el molibdeno, cuando se mezcla con cromo, es eficaz en la estabilización de la capa pasiva en la presencia de compuestos de cloruros, los cuales son altamente peligrosos porque provocan corrosión por picadura, estando presentes en cantidades considerables en toda la costra terrestre, especialmente en el agua de mar (NaCl) y en la mayoría de los ambientes industriales y petroquímicos. El carbono proporciona mayor resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables en un contenido de máximo 0,03%; el

manganeso en cantidades moderadas tiene el mismo efecto que en la aleación de níquel, sin embargo, el cambio de Ni por Mn no es práctico; por último, el níquel es el segundo elemento más importante entre los elementos presentes en el acero inoxidable ya que es el elemento que le confiere la microestructura austenítica (8).

Existen varias ecuaciones “de tipo empírico” que han sido desarrolladas a través de las últimas décadas, estas ecuaciones pueden predecir o entregar una estimación sobre la susceptibilidad a la corrosión por picadura de determinados aceros inoxidables a través de la composición química. Es importante resaltar, que estas ecuaciones no son del todo precisas y confiables, ya que fueron desarrolladas para aceros específicos, y se sabe que la resistencia a corrosión no solo depende de la composición química del acero sino también de las condiciones ambientales (temperatura y nivel de agresividad ambiental), de los procesos de producción, por ejemplo, se sabe que las inclusiones no metálicas son perjudiciales para la resistencia a la corrosión y este nivel de inclusiones no-metálicas se puede controlar a través del proceso de producción. Sin embargo en la industria se utilizan estas ecuaciones como un método económico y rápido para tomar decisiones rápidas o para aceptación del material.

Generalmente esas ecuaciones se les conoce como (*Pitting Resistance Equivalent, numero PRE*) una de estas es:

$$PRE = \% Cr + 3.3 \% Mo + 30\% N$$

La determinación del PRE de un acero inoxidable permite llevar a cabo un análisis comparativo de los diferentes aceros inoxidables. (8)

Existen otras, que llevan en cuenta no sólo el Cr, Mo y N, sino también el C, Mn y Ni. Y que son más adecuadas para los materiales utilizados en la presente investigación.

El numero MARC, que significa "Medida de la aleación para la resistencia a la corrosión", es la suma de las adiciones de aleación, en porcentaje en peso. Por definición sólo se aplica a la aleación de elementos en solución sólida y se ve que el carbono juega un papel beneficioso mientras el manganeso y níquel tienen una influencia negativa sobre la resistencia a la corrosión. Speidel presentó la ecuación MARC (*Measure of Alloying for Resistance to Corrosion*) para determinar la tendencia de corrosión de los aceros inoxidables. (9)

$$MARC = \% Cr + 3.3 Mo + 20N + 20C - 0.5Mn - 0.25Ni$$

En este caso las ecuaciones PRE y MARC, se aplicaron para comparar el acero UNS S20200 y el UNS S30403. La tabla 4 presenta la composición química y los valores PRE y MARC para los aceros de este estudio.

Tabla 4. Valores PRE y MARC de los aceros UNS S20200 y el UNS S30403

ACERO	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (%)	P (%)	PRE	MARC
UNS S30403	0,025	0,5	1,3	18,1	8,5	0,04	0	0,045	18,232	15,957
UNS S20200	0,042	0,36	7,09	14,88	4,06	0,062	0,25	0,034	22,5846	16,3646

2.3 CORROSIÓN

Según la norma ASTM G193, 2011, se define la corrosión como el deterioro que sufre una superficie, usualmente metálica, como resultado de una reacción química o electroquímica con su ambiente. Este deterioro altera principalmente las propiedades físicas y mecánicas del metal. (10)

La corrosión es un fenómeno que ocurre espontáneamente la cual se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Aunque existen muchas definiciones, es común que se describa la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y también puede afectar la integridad física de los objetos en los que se presente. Existen muchos recursos que se destinan para el estudio y la prevención de la corrosión, esta industria mueve cada año miles de millones de dólares porque este fenómeno es muy importante, ya que tiene implicaciones industriales tales como la degradación de los materiales que provoca interrupciones en actividades de la fábrica, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobre diseños costosos.

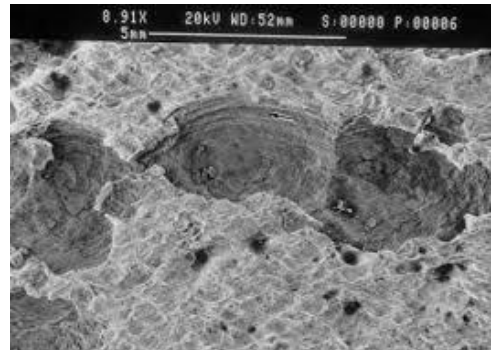
Es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelven cinco toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros, invisibles en cada pieza pero que, multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante (11).

Existen varios tipos de corrosión a los cuales los materiales están expuestos, ya que por la variedad de ambientes, la combinación de metales y las condiciones que se encuentran, se pueden presentar más de un tipo de ataque corrosivo. Los tipos más comunes de corrosión son: la corrosión galvánica, corrosión por erosión, corrosión por agrietamiento, corrosión por exfoliación, corrosión por ataque selectivo, corrosión intergranular, corrosión bajo tensión y por último corrosión por picadura; siendo este último el medio de corrosión de estudio de esta investigación. A continuación se hace una descripción detallada de este tipo de corrosión (12).

2.3.1 Corrosión por picadura. Este es un tipo de corrosión localizada que se produce en los materiales, en zonas de baja resistencia a la corrosión o en superficies de metal desprotegidas por una capa de óxido (película pasiva), como en el acero inoxidable y en el aluminio; donde la corrosión generalizada es casi nula para ambientes normales (esto no siempre se cumple en ambientes ácidos, dependiendo del contenido de Cr y Mo).

La corrosión por picadura se percibe como la presencia de pequeños orificios en la superficie que pueden tener diferentes formas y tamaños, dando la apariencia de poros que conllevan a la ruptura de la película de óxido, propagándose hacia el interior del material en forma de canales cilíndricos y produciendo una acelerada disolución del metal (Ver figura 6.a y 6.b). Esta corrosión genera fallas estructurales por debilitamiento y perforación en componentes.

Figura 6. Corrosión en un tornillo sinfín.



Fuente:https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQlqt9PPTHyUuhDRCaUBNWbt-w_jqAsbwjmeEprg42C4YnwXbDX4g

La corrosión por picadura es un proceso que se desarrolla lentamente, pueden transcurrir meses o a veces hasta años para que se haga evidente, pero puede presentar fallas inesperadas, las picaduras pueden tener diferentes formas y por lo general se presentan en superficies que están relativamente intactas. Se dice relativamente intactas debido a que la boca del orificio, en general, es más pequeña que el agujero interno (en escala milimétrica, similar a un pozo de petróleo), por lo que no son detectables sino hasta que el daño está avanzado. Por esto es considerada mucho más peligrosa que la corrosión uniforme con una tasa de 10 a 100 veces mayor. (13)

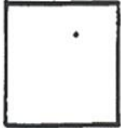














Dicha corrosión suele desarrollarse como un proceso de disolución anódica local, donde la pérdida del metal es acelerada por la presencia de iones de cloro y especies aniónicas agresivas; la concentración de cloro determina la severidad del picado.

En la superficie del metal recubierta por una película de óxido pasiva puede iniciarse el picado por los siguientes factores:

- Daño en la película pasiva ocasionado por rayones, en este caso el material actúa como cátodo y queda expuesta a los electrolitos formando una reacción anódica.
 - Partículas como inclusiones no metálicas, micro-segregaciones, partículas metálicas o inclusiones intermetálicas precipitadas a lo largo de los límites de grano que emergen a la superficie del metal, estos funcionan como ánodos ocasionando corrosión localizada y la formación de agujeros iniciales.
 - Tensiones localizadas que surgen en la superficie convirtiéndose en ánodos que inician la formación de agujeros.
 - El ambiente circundante no homogéneo que actúa sobre la capa pasiva forma agujeros iniciales.
- Cuando existe presencia de iones de cloro, los agujeros crecen por el proceso de naturaleza autocatalítica. Una vez que la perforación empieza a crecer, las condiciones permiten que esta siga creciendo.

La norma ASTM G46, titulada “Examen y evaluación de la corrosión por picadura”, muestra como las picaduras pueden ser clasificadas de acuerdo con la densidad, forma y tamaño. La figura 7 hace alusión a la norma G46.

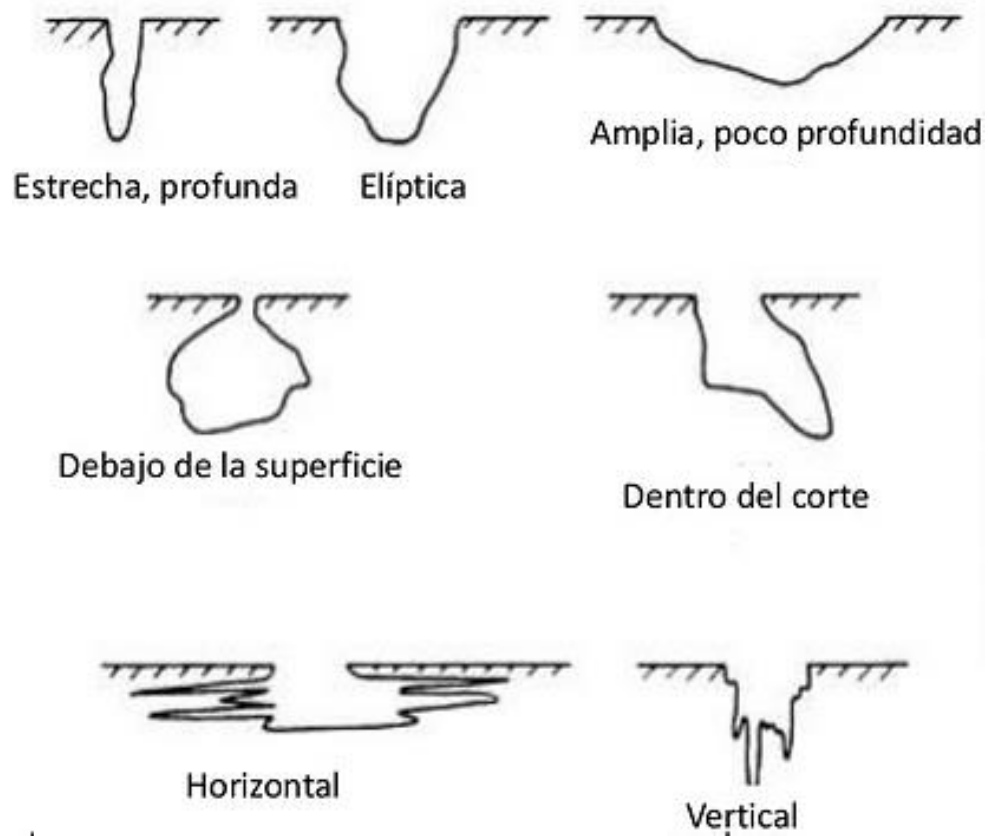
Figura 7. Morfología y caracterización de la corrosión por picadura.

	<u>A</u> DENSIDAD	<u>B</u> TAMAÑO	<u>C</u> PROFUNDIDAD
1	 $2,5 \times 10^3 / m^2$	 $0,5 \text{ mm}^2$	 $0,4 \text{ mm}$
2	 $1 \times 10^4 / m^2$	 $2,0 \text{ mm}^2$	 $0,8 \text{ mm}$
3	 $5 \times 10^4 / m^2$	 $8,0 \text{ mm}^2$	 $1,6 \text{ mm}$
4	 $1 \times 10^5 / m^2$	 $12,5 \text{ mm}^2$	 $3,2 \text{ mm}$
5	 $5 \times 10^5 / m^2$	 $24,5 \text{ mm}^2$	 $6,4 \text{ mm}$

Fuente: ASTM Standard G46 Showing Means of Characterizing pit density, size y Depth (Copyright ASTM)

Según la norma ASTM G46, la picadura puede presentar diversas formas entre ellas: estrecha-profunda, elíptica, ancha-poco profunda, subsuperficial, horizontal y vertical.

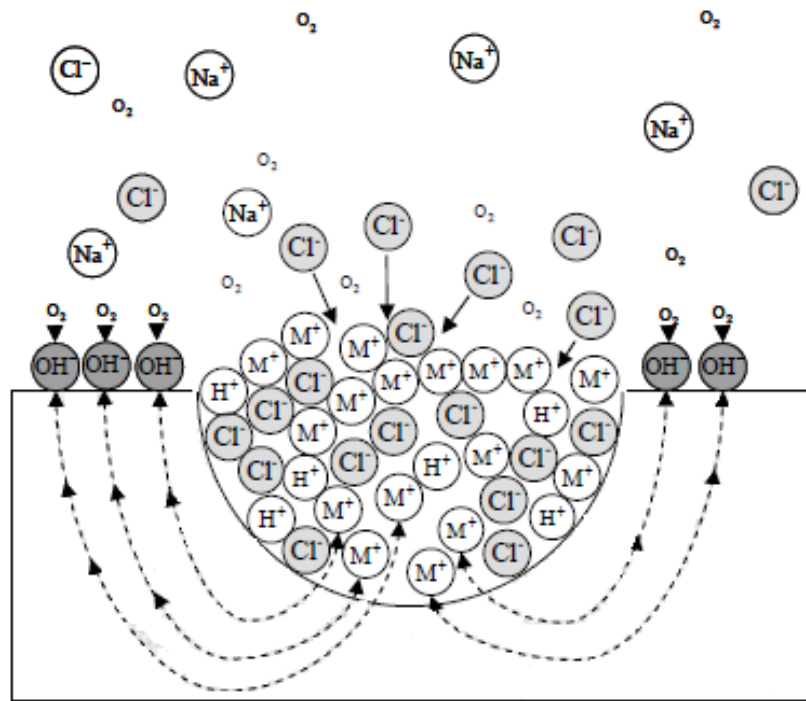
Figura 8. Variación en la sección transversal de la picadura.



Fuente: ASTM Standard G46 Portion Showing Variation of Pit Character (Copyright ASTM).

La corrosión por picadura es un proceso autocatalítico, ya que, dentro de las picaduras, se crean condiciones que estimulan la actividad continua para su crecimiento. La figura 9 muestra la naturaleza autocatalítica de una picadura creciendo en presencia de cloruro de sodio.

Figura 9. Mecanismo autocatalítico de corrosión por picadura



Fuente: *Corrosion Engineering* 3ra ed. Mars G. Fontana

2.4 TÉCNICAS Y/O MÉTODOS DE ENSAYOS DE CORROSIÓN

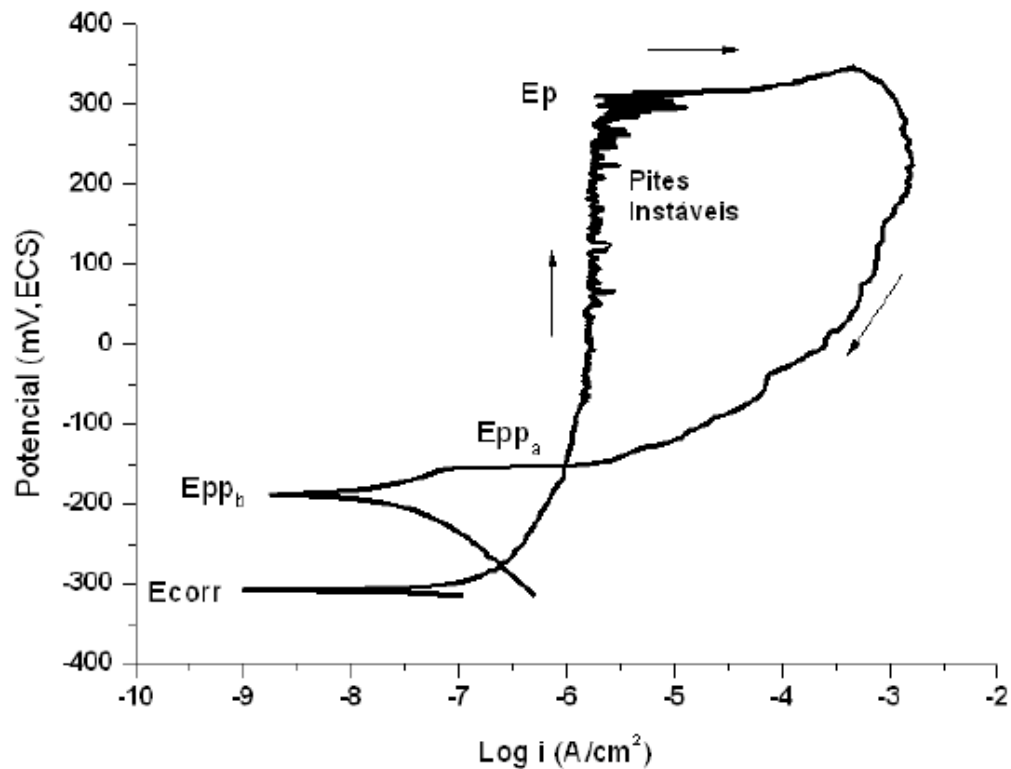
A continuación se enunciarán los procedimientos y/o métodos más usados en laboratorio para determinar la resistencia a la corrosión de los metales y aleaciones. Estas técnicas sirven para evaluar, controlar e investigar la corrosión de los metales sometidos a diferentes tipos de ataque corrosivo y así realizar una correcta interpretación de los resultados obtenidos en estos ensayos donde se describen brevemente algunas de las técnicas más utilizadas. (14)

2.4.1 Polarización potenciodinámica. La polarización potenciodinámica es una de las técnicas más utilizadas en la determinación de la resistencia a corrosión de materiales metálicos, varios tipos de corrosión pueden ser determinados a través de esta técnica, corrosión por picadura, corrosión intergranular y corrosión generalizada entre otras.

A través de los ensayos de corrosión por picaduras se pueden determinar dos parámetros termodinámicos muy importantes, el potencial de corrosión y el potencial de picadura (E_{corr} y E_p). Se determina la diferencia de potencial del elemento metálico en estudio, respecto a un electrodo de referencia en el electrolito de trabajo, para este procedimiento de medida de potencial se utiliza un Potenciostato/Galvanostato el cual es capaz de medir la diferencia de potencial

entre la superficie de la muestra y una solución acuosa o más comúnmente conocido como la solución electrolítica. En la figura 10 se puede apreciar un esquema de la curva de polarización potenciodinámica cíclica, realizada sobre un acero inoxidable UNS S30403 en una solución 0,6 M NaCl, donde se muestran los tres potenciales críticos que pueden ser proporcionados por esta técnica.

Figura 10. Curva de polarización potenciodinámica cíclica, realizada sobre un acero UNS S30403.



Fuente: *Efeito da temperatura de solubilização e da concentração de íons cloreto e sulfato sobre a resistência á corrosão por pite dos aços inoxidáveis austeníticos 17Cr-6Mn-5Ni e UNS S30403*. Calderón Hernández, José Wilmar.

2.4.2 Resistencia a la polarización lineal (LPR). Es una técnica electroquímica ampliamente utilizada en monitoreo de corrosión generalizada, se deriva de la polarización potenciodinámica. Consiste en aplicar una pequeña perturbación de corriente continua, de baja amplitud, de ± 10 -20mV, respecto al potencial de corrosión, determinándose la velocidad instantánea de corrosión.

2.4.3 Impedancia electroquímica (EIS). Consiste en la medida de la respuesta de la interface metal-ambiente, a perturbaciones de baja amplitud, y de frecuencias en el rango 0.05 a 10 Hz. Como resultado se obtiene el circuito eléctrico análogo al sistema corrosivo estudiado, determinándose los valores de los componentes de dicho circuito: resistencia a la polarización (R_P), resistencia de la solución (R_S) y capacitancia de la doble capa (C_{DL}). Esta técnica es particularmente útil en condiciones de baja conductividad del electrolito.

2.4.4 Ruido electroquímico (EN). Las medidas de ruido electroquímico son debidas a fluctuaciones espontáneas de potencial y/o corriente, generadas por variaciones en la cinética de reacciones de corrosión. Incluyen monitoreo de potencial bajo control galvanostático, corriente bajo control de potencial y fluctuaciones de corriente y potencial libres de los electrodos; a partir del análisis de datos registrados, se pueden obtener parámetros del proceso corrosivo tales como: Resistencia de ruido (R_N) e índice de localización (LI).

2.4.5 Cupones. Es el tipo de monitoreo más simple y antiguo donde se utilizan pequeñas piezas de metal (usualmente de forma rectangular), expuestas durante un periodo de tiempo prolongado al proceso en estudio. La velocidad de corrosión promedio, se determina conociendo la pérdida de peso, el área inicial y el tiempo de exposición. Sirven para determinar el tipo de corrosión presente, evidenciándose el picado u otra forma de corrosión localizada.

2.4.6 Resistencia. Son cupones “automáticos”, en el cual se expone un electrodo de metal a monitorear en el medio potencialmente corrosivo. El aumento de la resistencia eléctrica por pérdida de sección de metal comparada mediante un puente calibrado a otra probeta no corroible. Es una técnica comúnmente utilizada y de fácil automatización.

2.4.7 Inmersión. Este método es utilizado tradicionalmente por ser económico y relativamente simple, se basa en la pérdida de masa que ha experimentado un metal o aleación en contacto con un medio corrosivo. Consiste en sumergir totalmente una muestra del material en estudio, en una solución corrosiva, durante un periodo de tiempo determinado y luego retirarla para su análisis. Para este método se deben tener en cuenta varios parámetros tales como: composición de la solución, volumen, preparación de las muestras, temperatura, método de inmersión, ventilación, duración de la prueba y métodos de limpieza. Todos los pasos de este ensayo deben ser documentados y controlados para garantizar la reproducibilidad.

Estas pruebas de inmersión, se llevan a cabo para evaluar la resistencia a corrosión por picadura y por grieta. A través de tratamiento matemático y utilizando la ley de Faraday, la pérdida de peso se puede expresar en velocidad de corrosión ya sea en miligramos decímetro cuadrado día (mdd), milímetros por años (mm/año), pulgadas por año o milipulgadas por año (mpy) y millas por año.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación se mencionan los equipos y elementos utilizados para llevar a cabo las pruebas de inmersión bajo norma ASTM G 48 (procedimiento A), las cuales fueron realizadas en los Laboratorios de Tribología y Metalografía de la Universidad Tecnológica de Pereira.

En los laboratorios mencionados se encontraron los implementos necesarios para esta investigación, entre equipos y accesorios tales como: hojas de lija (con tamaños de grano: 100, 220, 400, 600 y 1000), paños para pulir con sus respectivas suspensiones líquidas a base de alúmina (de 0,3 y 1 μm), pulidora metalográfica, balanza analítica, microscopio óptico, destilador y desionizador de agua, equipo de baño ultrasónico, secador de aire caliente, cristalería de laboratorio, extractor de gases, así como todo el equipo de seguridad y de laboratorio necesarios, equipos de computación; compuestos químicos utilizados: ácido nítrico (HNO_3), ácido clorhídrico (HCl), alúmina (Al_2O_3), alcohol isopropílico ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$), cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

3.1 MATERIALES

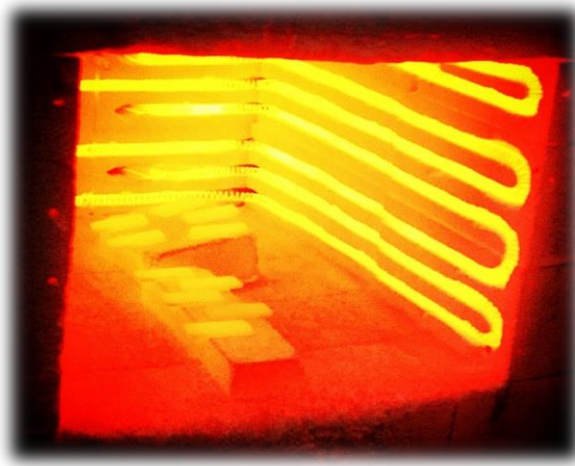
Este proyecto fue realizado con el objetivo de comparar la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidable austeníticos UNS S30403 y UNS S20200. El acero UNS S20200 fue donado por la Universidad de Sao Paulo Brasil, el cual se recibió en forma de chapa laminada en caliente, de 216 x 279 mm y con espesor de 3,0 mm, y el acero UNS S30103 fue adquirido con las medidas finales de 25 x 50 mm en la importadora y distribuidora Bronces y Láminas de Pereira S.A.

3.1.1 Preparación de muestras para las pruebas de inmersión. Se cortaron 30 muestras a partir de las chapas de acero laminadas en caliente, 15 muestras de cada material con espesor de 3,0 mm, mediante corte en cizalla y tamaño de 25 x 50 mm. Se tomaron 5 muestras de cada material y se sometieron a un tratamiento térmico de solubilización a 1000 °C, 1050 °C y 1100 °C por un tiempo de 20 minutos, hasta alcanzar la temperatura de austenización, luego se procedió a enfriar en agua hasta la temperatura ambiente. En las figuras 11 (a) y (b) se observan fotografías del horno ubicado en el Laboratorio de Metalografía de la UTP y en la figura 11 (c) se observa el sistema de enfriamiento utilizado.

Figura 11. (a y b) Horno eléctrico en el cual se sometieron las muestras a las diferentes temperaturas. (c) Recipiente con agua a temperatura ambiente.



(a)



(b)



(c)

Después de la solubilización, las muestras fueron redondearon en todos sus bordes y se procedió a pulir las caras con papel de lija, comenzando con un tamaño de grano 100, pasando por 220, 400 y finalmente 600, hasta obtener una superficie con textura similar. Se limpiaron las superficies con alcohol isopropílico ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$), en un baño ultrasónico (marca LSS (Lab Safty Suppli), modelo HB-4818T) ubicada en el laboratorio de Tribología. Se secaron con secador de chorro de aire caliente, se tomaron las dimensiones de cada muestra con un calibrador (pie de rey), para calcular la superficie total de exposición, se pesaron en una balanza analítica (marca VIBRA, serie 053450022), ubicada en el laboratorio

de Tribología, con una precisión de 0,0001 g, para determinar su masa. En la figura 12 se observan los equipos utilizados en este proceso.

Figura 12. (a) Lavador ultrasónico. (b) Calibrador pie de rey. (c) Secador de chorro de aire caliente. (d) Balanza analítica.



(a)



(b)



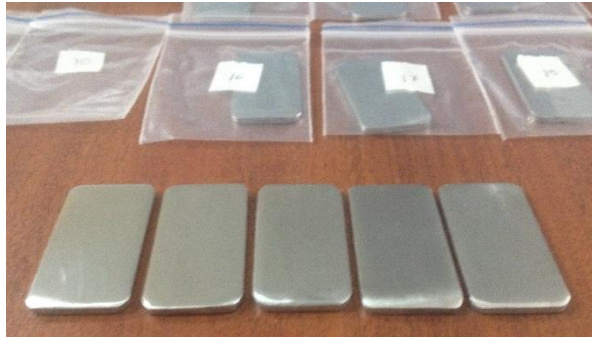
(c)



(d)

Las muestras se almacenaron individualmente en un sobre con una etiqueta numerada, la cual contenía sus datos, los cuales fueron almacenados en una tabla en Excel; esto se hizo con el propósito de facilitar su identificación sin hacer marcas directas sobre las muestras, con el fin de evitar discontinuidades que alteren el ataque corrosivo y los resultados del ensayo. En la figura 13 se observan algunas de las muestras y su sobre etiquetado.

Figura 13. Algunas de las muestras y sobres numerados para su identificación.



3.1.2 Preparación metalográfica. Con el fin de identificar la microestructura de los materiales de estudio, se realizó un procedimiento metalográfico para el cual se cortó una muestra de cada material, se llevó a un tamaño de 10 x 10 mm, se encapsuló en baquelita para facilitar el proceso de pulimento. El pulido grueso, el cual fue realizado de forma manual, se inició con hoja de lija tamaño 100 hasta llegar a la tamaño 1000 y posteriormente, el pulido fino o de acabado (realizado en máquina pulidora), se llevó a cabo con paños impregnados de una suspensión conteniendo polvo de alúmina (Al_2O_3), con tamaño de partícula de 1 y 0,3 μm . La superficie fue atacada químicamente, sumergiéndola durante 120 segundos en una solución formada por la mezcla de ácido nítrico (HNO_3) concentrado y ácido clorhídrico (HCl), en una proporción de tres partes a una, más conocida como agua regia. Esto se hizo con el fin de revelar la microestructura del material, incluyendo el tamaño de grano y los límites de grano. En la figura 14 se observa la máquina pulidora de paño (marca P-2T *Metallographic Polishing Machine*, serie 12022), ubicada en el laboratorio de tribología. En la figura 15 se muestra el microscopio óptico (marca AmScop, serie ME1400T-INF), con el cual se realizaron los exámenes metalográficos de los aceros utilizados en el presente trabajo para obtener imágenes de la microestructura.

Figura 14. Máquina pulidora metalográfica de paño.



Figura 15. Microscopio Óptico.



3.2 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.

La determinación de resistencia a la corrosión por picadura de los aceros UNS S30403 y S20200 se realizó por medio de los métodos establecidos en la norma ASTM, los cuales a continuación se describen.

3.2.1 Norma ASTM G48. Esta norma incluye los métodos de ensayo de laboratorio para los procedimientos de determinación de la resistencia, de los aceros inoxidables y aleaciones relacionadas, con la corrosión por picaduras y por agrietamiento, cuando se exponen a ambientes oxidantes con cloruro. La norma propone cuatro procedimientos identificados como métodos A, B, C y D.

Para este ensayo se utilizó el método A, el cual está diseñado para determinar la resistencia relativa a la corrosión por picadura de las aleaciones de acero inoxidable a base de níquel y cromo, en medios que contienen cloruro, y para acelerar el tiempo de iniciación de la picadura, en relación a ambientes naturales; por lo tanto, el daño por corrosión que se presentó durante la prueba debería ser mayor al ocurrido en entornos naturales, en cualquier periodo de tiempo similar.

El ensayo que permitió evaluar la resistencia a la corrosión de los aceros en estudio, se realizó por el método de gravimetría (pérdida de masa), por inmersión en solución de cloruro férrico, a una temperatura de ensayo 22 °C. Para la solución electrolítica se disolvieron 100 g de cloruro férrico, de grado reactivo ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), en 900 ml

de agua destilada y des-ionizada (aproximadamente un 6% de FeCl_3 en masa). La solución se filtró a través de papel de filtro para eliminar las partículas insolubles presentes. La proporción de solución, con relación al área de superficie de las muestras, fue de 5 ml/cm^2 ; en este caso se utilizaron 1500 ml de solución de cloruro férrico.

Después de que la temperatura de la solución se equilibró con la temperatura ambiente, ya que la temperatura debe ser constante durante el tiempo de la prueba, se ubicaron las muestras en una bandeja de vidrio, sobre apoyos cilíndricos del mismo material de la bandeja, y se sumergieron en la solución cubriendo por completo las probetas. En la figura 16 (a) se observa la disposición de las probetas en el recipiente de prueba y en la figura 16 (b) se observan las probetas dentro de la solución.

Figura 16. Disposición de las muestras durante los ensayos de inmersión. (a) antes de la inmersión. (b) durante la inmersión.



(a)



(b)

Una vez terminado el periodo de tiempo de la prueba, que fue de 72 h, se retiraron las muestras de la bandeja, se enjuagaron con agua corriente y se limpiaron con un cepillo de cerdas de nylon para eliminar los productos de corrosión. Como era difícil eliminar los productos de corrosión de las picaduras más profundas, se utilizó limpieza ultrasónica, seguida del secado de las muestras con chorro de aire caliente. Se pesó cada muestra nuevamente en la balanza analítica y se guardó en su respectivo sobre sellado y marcado para su examen posterior.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos en la caracterización de la microestructura previa, de los ensayos de inmersión, acompañados de un análisis de la morfología de las picaduras en cada material, para posteriormente realizar la discusión correspondiente.

4.1 METALOGRAFÍA

Por medio del microscopio óptico se obtuvieron las micrografías de los aceros inoxidable UNS S30403 y del UNS S20200 preparados metalográficamente, pero sin ataque químico, donde se pudo verificar la presencia de inclusiones como se observa en la figura 17 en cada uno de los materiales.

Figura 17. (a) Inclusiones en el acero UNS S30403 y (b) Inclusiones en el acero UNS S20200



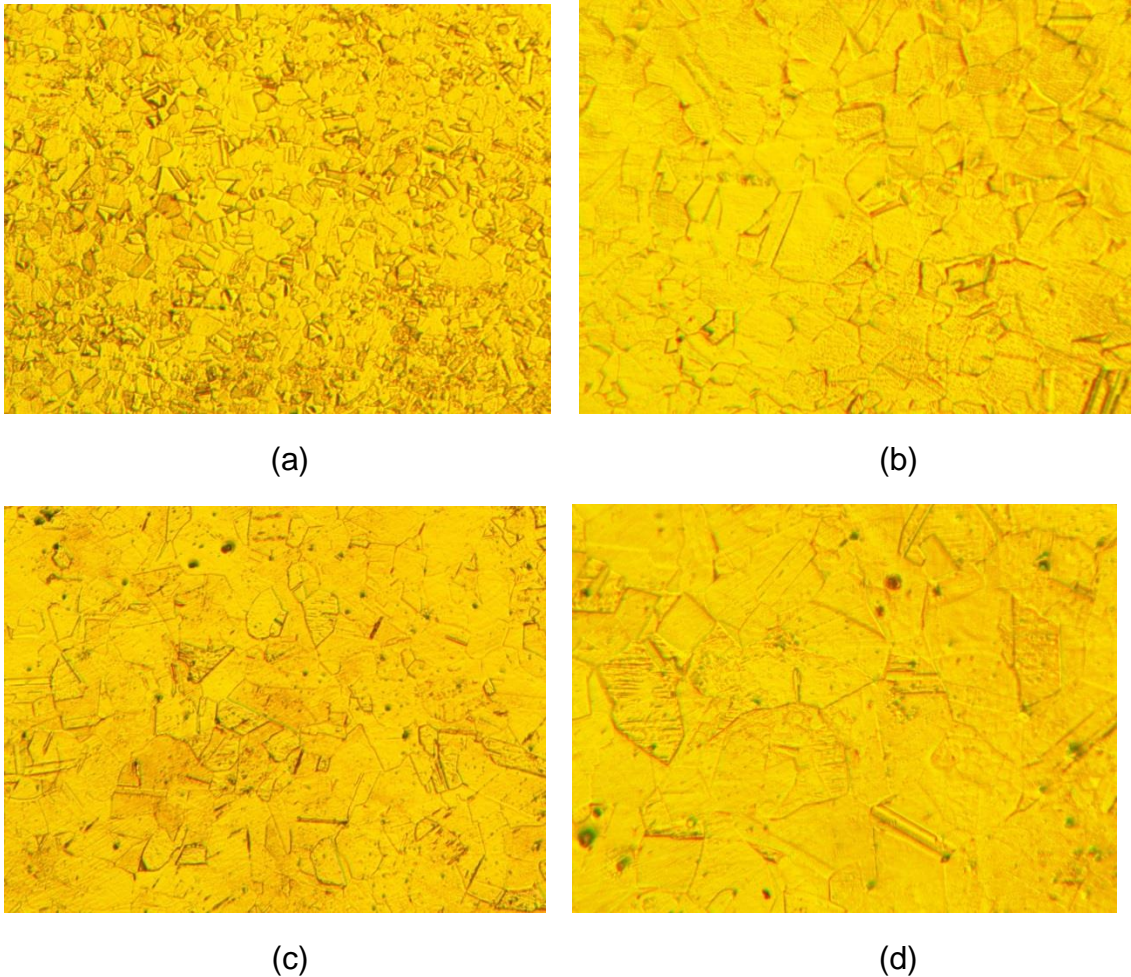
(a)



(b)

En la figura 18 (a) a (d), se presentan las micrografías de ambos aceros, a 100X y 200X, donde se puede evidenciar la microestructura de tipo austenítico y corroborar la similitud del tamaño de grano.

Figura 18. Micrografías de los aceros: UNS S30403 (a) y (b) y UNS S20200 (c) y (d) a 100X y 200X respectivamente (ataque agua regia).



Como se observa de las micrografías presentadas en la figura 18, los dos materiales utilizados en esta investigación, presentan una similitud en cuanto a la matriz original que es de tipo austenítica y una leve diferencia en el tamaño de grano.

4.2 PRUEBAS DE INMERSIÓN

Una vez finalizadas las pruebas de inmersión, se determinó la pérdida de peso que experimentó el material con el fin de obtener la velocidad de corrosión, que de acuerdo con la norma ASTM G1, se define esta velocidad de corrosión como CR, de las siglas en inglés (*Corrosion Rate*), así:

$$CR = \frac{KW}{ATD} \quad (1)$$

Donde,

K: Constante de corrosión

t: tiempo de exposición (h)

A: Área de exposición (cm²)

W: Masa perdida (gr)

D: Densidad en (gr/cm³)

Existen muchas unidades para expresar la velocidad de corrosión, en dependencia de las unidades en las que se expresan t, A, W y D; donde el valor apropiado de la constante K se elige de la tabla 5.

Tabla 5. Unidades de la velocidad de corrosión y valores de la constante K.

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year (um/y)	8.76×10^1
picometres per second (pm/s)	2.78×10^8
grams per square meter per hour (g/m ² ·h)	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
micrograms per square meter per second (μg/m ² ·s)	$2.78 \times 10^6 \times D$

Fuente: ASTM G1

El valor de la constante K, usado en el presente trabajo, fue de $1,00 \times 10^4 \times D$; reemplazando este valor en la ecuación anterior, se obtiene que la velocidad de corrosión CR es:

$$CR = \frac{1.00 \times 10^4 W}{AT} \quad (2)$$

En la tabla 6 se muestran los valores de CR para cada una de las muestras usadas en este trabajo, después de haber sido realizada la prueba de inmersión.

Tabla 6. Resultados prueba de inmersión

ITEM	SERIE MATERIAL	TEMPERATURA (°C)	W PERDIDA DE MASA (gr)	ESPESOR (m)	LARGO (m)	AREA (m)	AREA (m²)	VOLUMEN (m3)	TIEMPO DE INMERSION (h)	CR VELOCIDAD DE CORROSION (gr/m²h)
1	UNS 202	1000	0,5352	0,0027	0,05095	0,0263	0,001339985	3,61796E-06	72	2826,362484
2	UNS 202	1000	0,729	0,0027	0,0513	0,02625	0,001346625	3,63589E-06	72	3857,142857
3	UNS 202	1000	0,5945	0,00245	0,0504	0,0253	0,00127512	3,12404E-06	72	3263,614405
4	UNS 202	1000	0,6308	0,0028	0,0513	0,0263	0,00134919	3,77773E-06	72	3331,220955
5	UNS 202	1000	0,6617	0,0024	0,0507	0,0254	0,00128778	3,09067E-06	72	3618,219598
6	UNS 304	1000	0,5291	0,0029	0,0511	0,0261	0,00133371	3,86776E-06	72	2815,559813
7	UNS 304	1000	0,5522	0,00285	0,0513	0,0261	0,00133893	3,81595E-06	72	2938,484461
8	UNS 304	1000	0,5999	0,0029	0,0509	0,0261	0,00132849	3,85262E-06	72	3192,315879
9	UNS 304	1000	0,362	0,0029	0,05125	0,02615	0,001340188	3,88654E-06	72	1922,668366
10	UNS 304	1000	0,4664	0,0028	0,0512	0,0259	0,00132608	3,71302E-06	72	2501,072501
11	UNS 202	1050	0,5341	0,0028	0,05	0,0262	0,00131	0,000003668	72	2831,318914
12	UNS 202	1050	0,7524	0,0028	0,0512	0,025	0,00128	0,000003584	72	4180
13	UNS 202	1050	0,8766	0,00255	0,05055	0,0254	0,00128397	3,27412E-06	72	4793,307087
14	UNS 202	1050	0,5251	0,0028	0,0517	0,0261	0,00134937	3,77824E-06	72	2794,274159
15	UNS 202	1050	0,5914	0,0025	0,0505	0,02515	0,001270075	3,17519E-06	72	3265,959797
16	UNS 304	1050	0,5826	0,0029	0,051	0,02625	0,00133875	3,88238E-06	72	3082,539683
17	UNS 304	1050	0,4664	0,0029	0,051	0,02625	0,00133875	3,88238E-06	72	2467,724868
18	UNS 304	1050	0,4395	0,0029	0,0514	0,02625	0,00134925	3,91283E-06	72	2325,396825
19	UNS 304	1050	0,9053	0,0029	0,05135	0,0262	0,00134537	3,90157E-06	72	4799,08821
20	UNS 304	1050	1,082	0,0029	0,0513	0,02615	0,001341495	3,89034E-06	72	5746,760144
21	UNS 202	1100	0,8582	0,00265	0,0509	0,0254	0,00129286	3,42608E-06	72	4692,694663
22	UNS 202	1100	0,8537	0,0027	0,05055	0,0253	0,001278915	3,45307E-06	72	4686,539306
23	UNS 202	1100	0,6413	0,00285	0,05065	0,0252	0,00127638	3,63768E-06	72	3534,501764
24	UNS 202	1100	0,6272	0,0027	0,0506	0,02545	0,00128777	3,47698E-06	72	3422,833442
25	UNS 202	1100	0,9187	0,0027	0,05045	0,0253	0,001276385	3,44624E-06	72	5043,368467
26	UNS 304	1100	0,6443	0,0029	0,05125	0,02605	0,001335063	3,87168E-06	72	3435,167413
27	UNS 304	1100	0,5807	0,00265	0,05115	0,02615	0,001337573	3,54457E-06	72	3084,236244
28	UNS 304	1100	0,7037	0,00285	0,0513	0,026	0,0013338	3,80133E-06	72	3759,081197
29	UNS 304	1100	0,7246	0,00285	0,05135	0,0259	0,001329965	3,7904E-06	72	3885,671386
30	UNS 304	1100	0,6017	0,00285	0,05115	0,02615	0,001337573	3,81208E-06	72	3195,772254

Con base en los datos suministrados en la tabla 6, se realizaron las gráficas mostradas en las figuras 19 y 20, donde se presentan los resultados correspondientes a la velocidad de corrosión con respecto a la temperatura y, a la pérdida de masa con respecto a la temperatura; respectivamente.

Figura 19. Velocidad de corrosión en función de la temperatura.

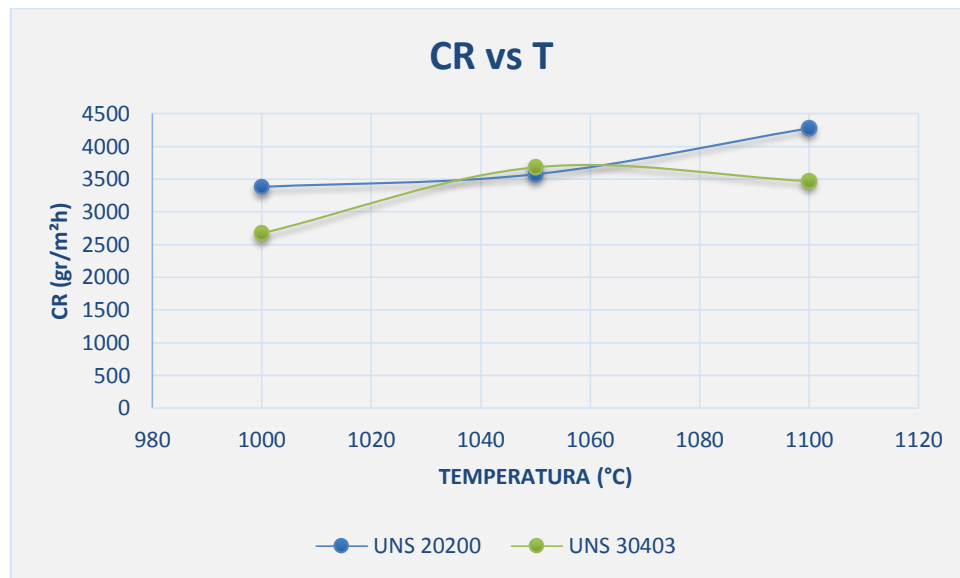
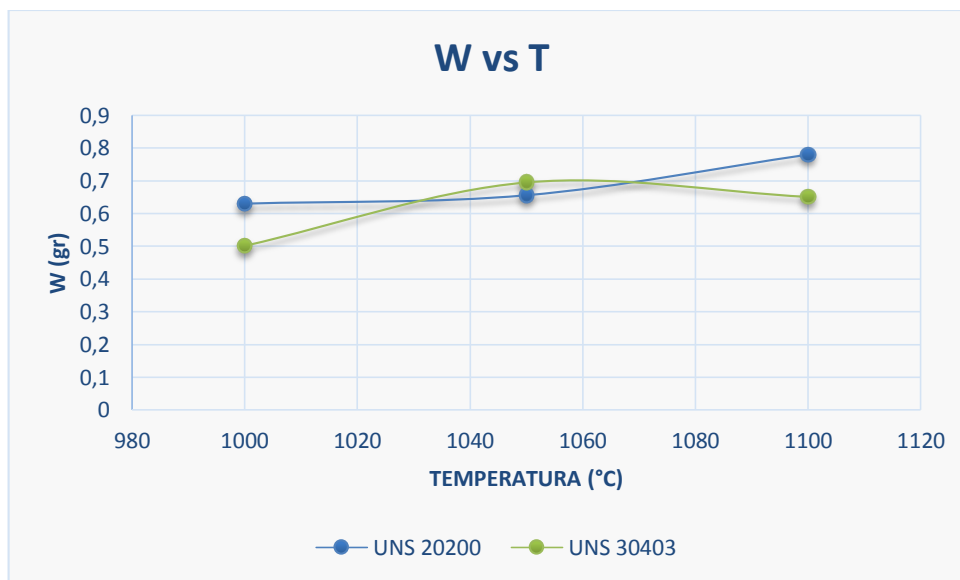


Figura 20. Pérdida de masa en función de la temperatura.



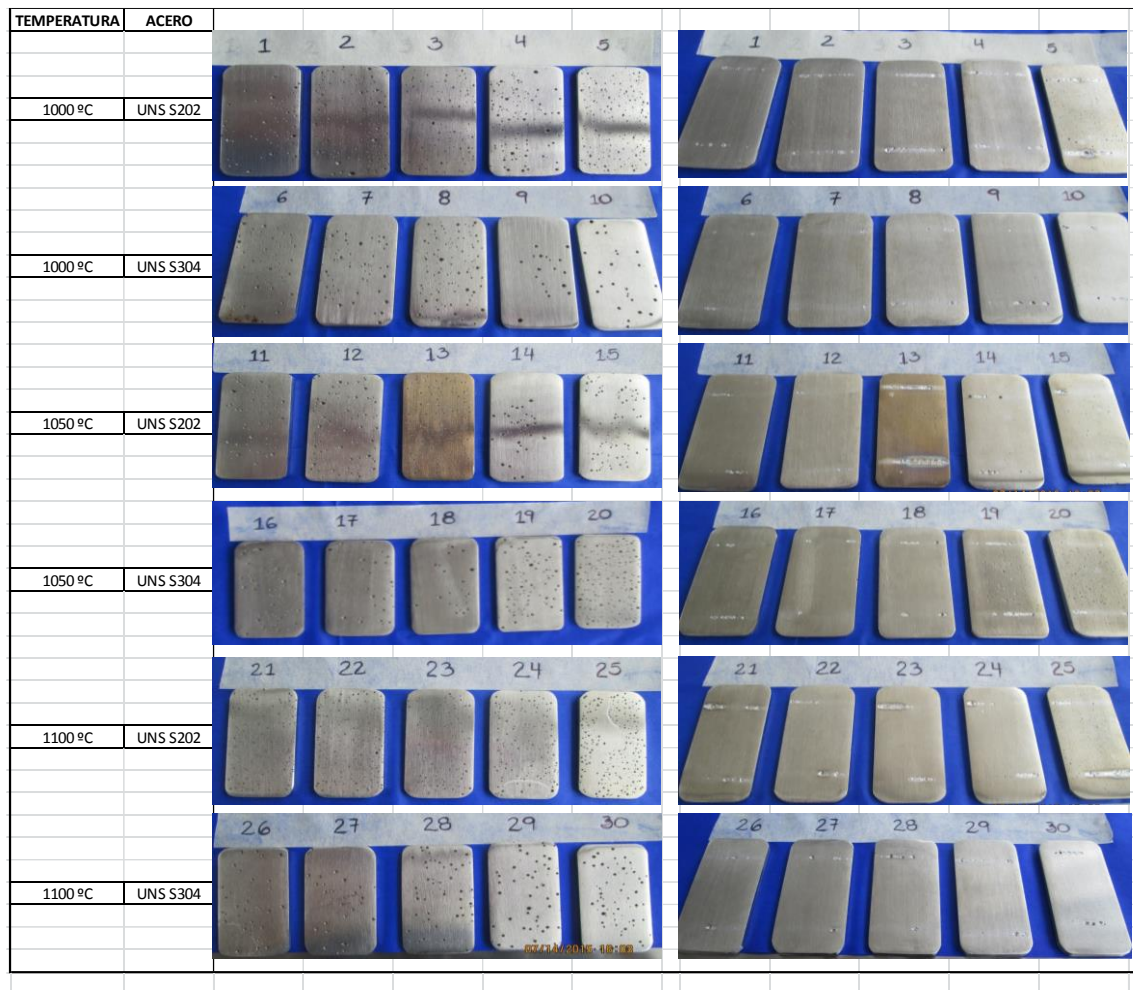
Como se puede observar en las gráficas anteriores, el acero UNS S20200, representado por la línea azul, presenta, tanto en la pérdida de masa como en la velocidad de corrosión, un comportamiento ascendente que indica que este material tiene mayor susceptibilidad a la corrosión por picadura que el UNS S30403.

Cabe destacar que el ataque más agresivo (velocidad de corrosión y pérdida de masa), en el acero UNS S20200, se presentó a una temperatura de 1100 °C, mientras que en el acero UNS S30403 fue más crítico a una temperatura de 1050 °C. El acero UNS S20200 a temperaturas de 1000 y 1050 °C, tuvo un comportamiento casi lineal, es decir, no presentó mayor variación en la velocidad de corrosión ni en la pérdida de masa, las cuales vienen a ser notorias a una temperatura de 1100 °C. Por el contrario, el acero UNS S30403, presentó un incremento notable en la velocidad de corrosión entre 1000 y 1050 °C; mientras que a 1100 °C la velocidad de corrosión y la pérdida de masa fueron menores.

Analizando los resultados obtenidos, después de la prueba de inmersión, se pudo determinar que existe una variación de la resistencia a la corrosión sujeta al cambio de temperatura de austenización a la que fueron sometidas las muestras analizadas; ya que al observar el comportamiento de los dos materiales en la gráfica CR vs T, figura 19, a una temperatura de 1050 °C, el acero UNS S20200 presentó menor velocidad de corrosión que el acero UNS S30403, mientras que a temperaturas de 1000 °C y 1100 °C, el acero UNS S30403 obtuvo menor velocidad de corrosión que el acero UNS S20200. El efecto de pérdida de masa (W), fue directamente proporcional a la velocidad de corrosión en dichos aceros.

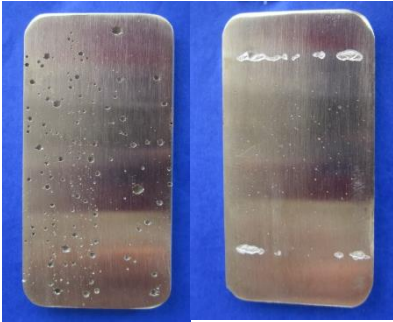

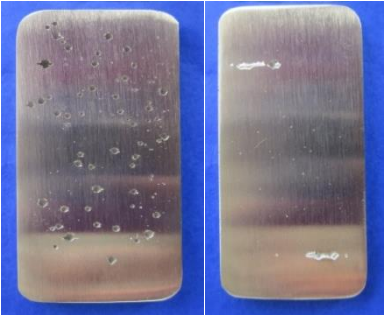
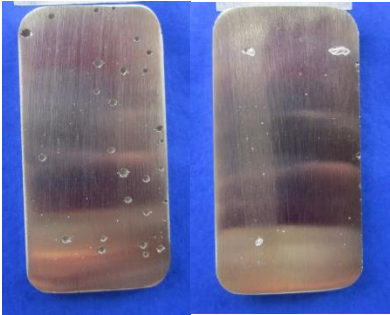

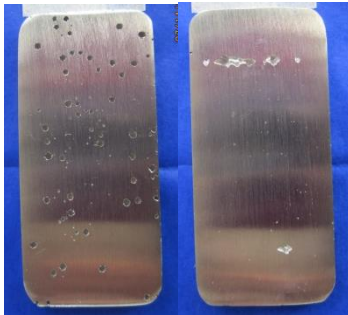
Como resultado de las pruebas de inmersión, se presentan las figuras 21 y 22, fotografías de los aceros UNS S20200 y UNS S30403, donde se pueden apreciar las picaduras resultantes y su morfología.

Figura 21. Visualización de los daños causados por la corrosión por picadura después de la inmersión, cara anterior (izquierda) y posterior (derecha) de cada muestra.



A continuación, como se indica en la figura 22, se eligió aleatoriamente una muestra de acero UNS 20200 y una del UNS S30403, de cada una de las condiciones de temperatura de solubilización a las que fueron sometidas, con el fin de observar detalladamente los daños causados después de la prueba de inmersión; cabe anotar que todas las muestras tuvieron el mismo tiempo de inmersión.

Figura 22. Muestras de cada material luego de ser sometidas a inmersión con presencia de picaduras.

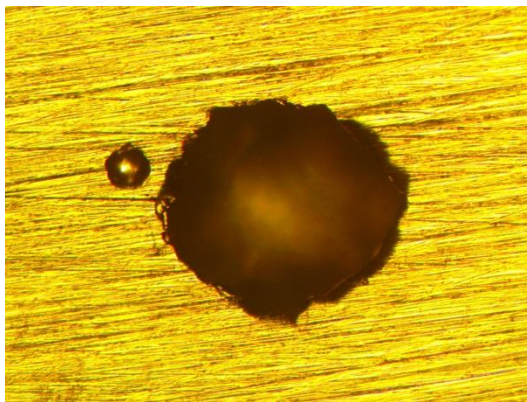
TEMPERATURA 1000 °C	
UNS S20200	UNS S30403
	
TEMPERATURA 1050 °C	
UNS S20200	UNS S30403
	
TEMPERATURA 1100 °C	
UNS S20200	UNS S30403
	

En los dos materiales se pudo observar que la corrosión se presentó en mayor cantidad sobre las caras superiores, mientras que en las caras inferiores la corrosión

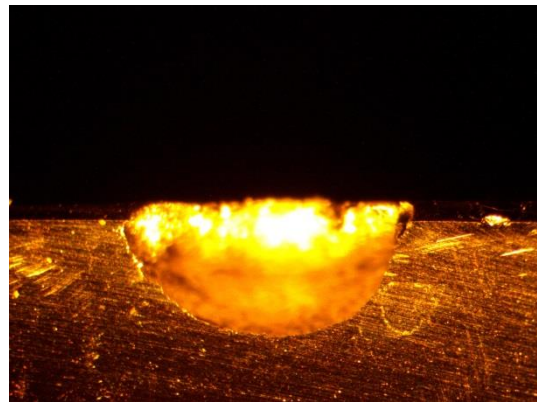
presentó un patrón de forma localizada en los puntos de apoyo o superficie de contacto con las barras cilíndricas.

En las figuras 23 y 24 se muestran micrografías de los aceros UNS S20200 y UNS S30403, donde se observan las picaduras resultantes y su morfología. Para ello se cortó una muestra de cada acero pasando por una picadura para apreciar su profundidad y su forma.

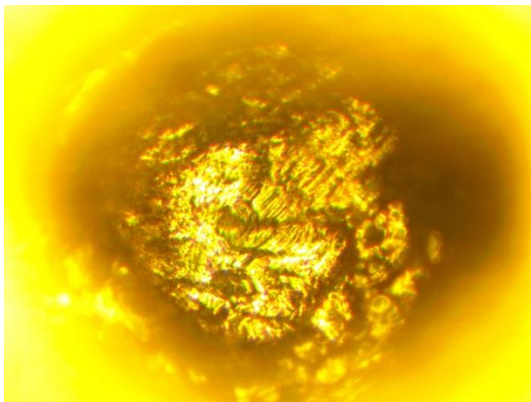
Figura 23. Micrografía del acero UNS S20200. (a) Contorno total de la picadura (100X) y (b) Contorno seccionado de la picadura (100X). (c) Morfología interna de la picadura (200X). (d) Morfología interna de la sección transversal de la picadura (100X)



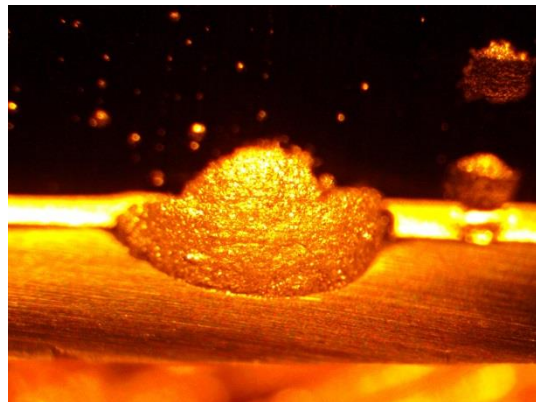
(a)



(b)

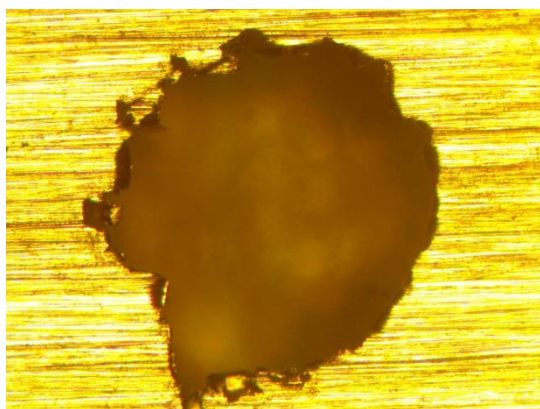


(b)

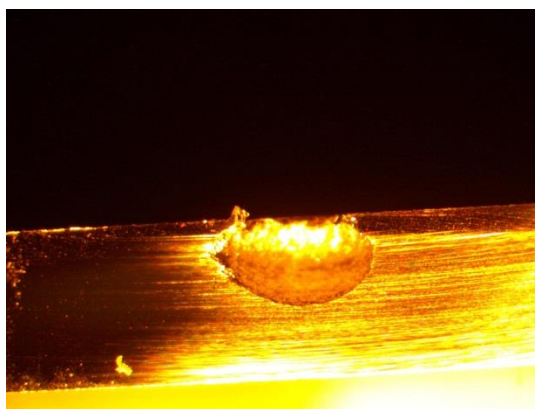


(d)

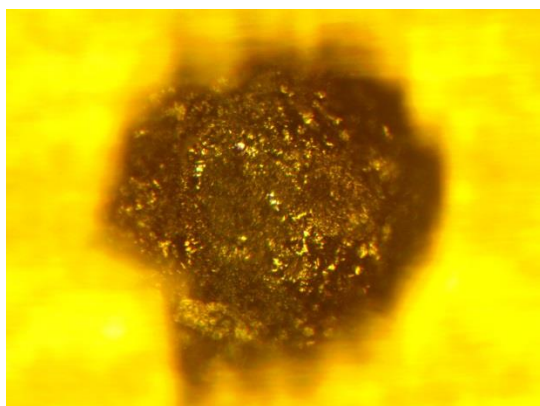
Figura 24. Micrografía del acero UNS S30403. (a) Contorno total de la picadura (100X) y (b) Contorno seccionado de la picadura (40X). (c) Morfología interna de la picadura (200X). (d) Morfología interna de la sección transversal de la picadura (40X)



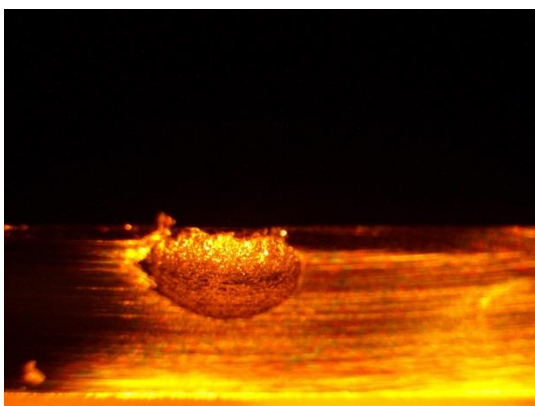
(a)



(b)



(c)



(d)

5. CONCLUSIONES

La composición química de cada acero es un factor determinante en la resistencia a la corrosión, como es el caso del acero UNS S30403 y del acero UNS S20200, cuyas composiciones químicas varían. A mayor contenido de Cr mayor es la resistencia a la corrosión. Este es uno de los factores que hace que el acero UNS S30400 tenga mejor resistencia a la corrosión que el UNS S20200.

Como el Ni es el segundo más importante de los elementos del acero inoxidable, dentro de la composición química de los dos aceros en estudio, existe una diferencia significativa de este elemento, teniendo el acero UNS S30400 (8,5%), más del doble de porcentaje de contenido que el UNS S20200 (4,06%), lo que permite que el material con mayor contenido de este elemento sea más resistente al ataque de los ácidos reductores o de los ácidos de bajo efecto oxidante.

En general, el acero UNS S30403 tiene mejor resistencia a la corrosión por picadura que el acero UNS S20200, a excepción de la temperatura de solubilización de 1050 °C, donde el acero UNS S30403 presenta un grado de picadura más alto que el acero UNS S20200. Una temperatura de solubilización de 1000 °C mejora la resistencia a la corrosión por picaduras de los aceros austeníticos UNS S30403 y UNS 20200 en comparación con las temperaturas de 1050 °C y 1100 °C.

6. RECOMENDACIONES

Al momento de cortar las probetas para realizar su estudio, es importante que el corte de todas las probetas sea paralelo o perpendicular al sentido de la laminación, con el fin que las condiciones sean iguales para todas las muestras y así evitar que unas áreas sean más susceptibles que otras a la corrosión.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. *Celebración del centenario del acero inoxidable*. **BRADLEY, Kevin**. s.l. : Stephanie Dunn, Mayo de 2012, Revista Nickel, pág. 20.
2. **ISSF, International Stainless Steel Forum**. The Stainless Steel Family. [En línea] 17 de Junio de 2013. www.worldstainless.org.
3. **DONALD R., Askeland**. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 3. s.l. : International Thomson Editores, S.A de C.V., 1998.
4. **OBTESOL, Observatorio Tecnológico de Soldadura**. Ferríticos. [En línea] 9 de Febrero de 2007. www.obtesol.es.
5. **CHARLES, Jacques**. The New 200- Series: An Alternative Answer to ni Surcharge Dream or Nightmare. [En línea] 2005. www.euroinox.org/pdf/map/paper/TheNew200-series_EN.pdf.
6. **PSP, Penn Stainless Products, Inc.** ALEACION 304/304L ESPECIFICACIONES: UNS S30400/S30403. [En línea] <http://www.pennstainless.com/stainless-grades/300-series-stainless-steel/304l-stainless-steel-2/>.
7. **AZoNetwork UK Ltd**. Stainless Steel Grade 202 (UNS S20200). [En línea] 27 de Febrero de 2013. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8209>.
8. **PANCORBO, Francisco J**. *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales utilizados en la edificación*. Barcelona : Marcombo S.A., 2011.
9. **M. O., Speidel**. *Nitrogen Containing Austenitic Stainless Steels*. Werkstofftech : s.n., 2006. pág. 877.
10. **ASTM G193-12d**. *Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion*. West Conshohocken : ASTM International, 2012. ASTM G193-12d, 2011.
11. **Fundación Wikimedia, Inc**. Corrosión. [En línea] 01 de 03 de 2016. <https://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>.

12. **H. H., Uhlig.** *Uhlig's Corrosion Handbook*. 2da. Londres : (R. W. Revie) John Wiley & Sons, 2000.
13. **ALVARADO Blanco, Jorge.** Corrosión en Metales. [En línea] Noviembre de 2010. <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32904/1/alvaradoblanco.pdf>.
14. **ASTM G5-94.** *Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. West Conshohocken : ASTM International, 1999.
15. **Facultad de Ingenieria, Universidad de la Republica.** Monitoreo en Corrosión: Evaluación de la velocidad y localización del proceso. [En línea] Uruguay, 5 de Septiembre de 2007. <https://www.fing.edu.uy/iq/cursos/ipeq/teorico/2007/4-9.pdf>.